

---

## PEMISAHAN DAN ANALISIS $^{137}\text{Cs}$ DARI LARUTAN PELAT ELEMEN BAKAR U-7%Mo/Al

**Dian. A, Novarty, Yanlinastuti, Aslina B Ginting, Rosika K, Arif N, Boybul**

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, BATAN

Kawasan Puspipetek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail : [ad\\_09@ymail.com](mailto:ad_09@ymail.com)

(Naskah diterima : 10-08-2016, Naskah direvisi: 29-08-2016, Naskah disetujui:  
15-09-2016)

### ABSTRAK

#### PEMISAHAN DAN ANALISIS $^{137}\text{Cs}$ DARI LARUTAN PELAT ELEMEN BAKAR U-7%Mo/Al.

Pemisahan cesium dari larutan pelat elemen bakar (PEB) U-7Mo/Al telah dilakukan dengan menggunakan metode pengendapan dan penukar kation. Tujuan penelitian adalah mendapatkan metode yang valid untuk pemisahan cesium dari larutan PEB U-7Mo/Al melalui penentuan parameter unjuk kerja metode yaitu akurasi, presisi dan rekovery. Metode pengendapan dan metode penukar kation yang digunakan mengacu kepada metode ASTM 690-000 dan kepada hasil penelitian  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ . Penentuan parameter unjuk kerja metode pengendapan dilakukan dengan menggunakan larutan sampel PEB U-7%Mo/Al sebanyak 150  $\mu\text{L}$ , larutan standar  $^{137}\text{Cs}$  sebanyak 50  $\mu\text{L}$  dalam 2 mL HCl 0,1N. Larutan dikenakan proses pengendapan dengan menggunakan pereaksi  $\text{HClO}_4$  pekat dan penambahan senyawa *carrier*  $\text{CsNO}_3$  seberat 225 mg pada temperatur  $0^\circ\text{C}$  selama 1 jam, sedangkan proses penukar kation dilakukan dengan menggunakan resin zeolit Lampung sebanyak 400 mg. Proses penukar kation dilakukan secara *batch* dengan pengocokan selama 1 jam. Hasil proses pengendapan diperoleh endapan  $\text{CsClO}_4$  dan penukar kation diperoleh berupa padatan cesium - zeolit serta supernatan. Pengukuran dan analisis radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dalam endapan  $\text{CsClO}_4$  dan padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dilakukan dengan spektrometer gamma. Hasil pengukuran diperoleh nilai cacahan radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  per detik (cps). Perhitungan rekovery metode dilakukan dengan perbandingan nilai cacahan radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  sebelum dan sesudah proses pemisahan. Hasil pemisahan radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dari larutan PEB U-7Mo/Al menggunakan metode pengendapan diperoleh rekovery sebesar 95,56 % dengan akurasi dan presisi pengukuran masing-masing sebesar 0,375 % dan 1,875 %, sedangkan rekovery pemisahan radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dengan metode penukar kation diperoleh rekovery sebesar 26,73 %. Hal ini menunjukkan bahwa metode pengendapan lebih baik dari pada metode penukar kation untuk pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dari larutan bahan bakar PEB U-7Mo/Al.

**Kata Kunci:** pemisahan cesium, metode pengendapan, penukar kation, zeolit Lampung, bahan bakar U-7%Mo/Al.

---

## ABSTRACT

**SEPARATION OF CESIUM FROM U-7MO/AL FUEL PLATE SOLUTION HAS BEEN DONE BY USING PRECIPITATION METHOD AND CATION EXCHANGE.** *The aim of this research is to get a valid method of separating cesium from U-7Mo/Al fuel plate solution through determination of parameter of method (accuracy, precision, and recovery). Precipitation method and cation exchange method that are used refer to standard ASTM 690-000 and research result of  $U_3Si_2/Al$ . Parameter method determination has been done by using 150  $\mu L$  sample (U-7%Mo/Al fuel plate solution, 50  $\mu L$  of standard solution in 2 mL of HCl 0,1 N. The sample solution was undergone precipitation process by using  $HClO_4$  concentrated and 225 mg of  $CsNO_3$  as carrier in temperature  $0^\circ C$  for an hour, while exchange cation process was done by using 400 mg of resin zeolit Lampung. The analysis of  $^{137}Cs$  in  $CsClO_4$  and  $^{137}Cs$  - zeolit was done by gamma spectrometre. Determination of recovery method was done by comparing count value of  $^{137}Cs$  before and after separation process. Recovery of precipitation method was obtained 95.56 % with accuracy and precision measurement of 0.375 % and 1.875 % respectively, while recovery of cation exchange method obtained 26.73 %. To sum up, the results show that precipitation method better than exchange cation method for separation  $^{137}Cs$  from U-7Mo/Al fuel plate solution.*

**Keywords:** cesium separation, precipitation method, cation exchange, zeolit Lampung, U-7% Mo/AL fuel plate.

## PENDAHULUAN

Program pengalihan bahan bakar dari pengkayaan tinggi ke bahan bakar pengkayaan rendah telah dicanangkan sejak tahun 1978 dengan tujuan mengurangi dan menghindari penggunaan uranium untuk keperluan persenjataan oleh orang-orang yang tidak bertanggung jawab. Pengalihan penggunaan bahan bakar dengan uranium pengkayaan rendah menyebabkan jumlah  $^{235}\text{U}$  dalam bahan bakar akan menurun<sup>[1]</sup>. Hal ini akan berdampak kepada desain bahan bakar dengan ukuran atau dimensi yang tetap. Dalam upaya mempertahankan unjuk kerja reaktor seperti pada penggunaan bahan bakar uranium pengkayaan tinggi maka alternatif yang memungkinkan dan ekonomis adalah penggunaan material baru yang memiliki densitas tinggi. Salah satu jenis bahan bakar densitas tinggi yang telah digunakan adalah bahan bakar uranium dengan paduan Mo<sup>[2]</sup>. Bahan bakar paduan berbasis U-Mo memiliki sifat-sifat yang dipersyaratkan untuk pembuatan bahan bakar reaktor riset, diantaranya adalah mempunyai tampang lintang serapan neutron yang rendah dan olah ulang gagal proses produksi atau pasca iradiasi lebih mudah bila dibandingkan dengan bahan bakar jenis oksida maupun silisida<sup>[3]</sup>.

Penelitian dan pengembangan dari bahan bakar reaktor riset berbasis UMo merupakan program internasional dalam memenuhi densitas uranium yang tinggi antara 8-9 gU/cm<sup>3</sup> sesuai program *Reduced Enrichment Research and Test Reactor* (RERTR). Sesuai tugas dan fungsinya Pusat Teknologi Bahan bakar Nuklir (PTTBN) hingga tahun 2015 telah mengembangkan teknologi fabrikasi bahan bakar UMo dan hingga saat ini telah menghasilkan pelat elemen bakar (PEB) U-7%Mo. Pemilihan fabrikasi PEB paduan uranium U-Mo dengan jumlah Mo sebesar 7 % berdasarkan hasil penelitian sebelumnya telah dilakukan beberapa pengujian terhadap ingot dan

pelat paduan bahan bakar UMo dengan variasi Mo dari 7 %, 8 % dan 9 %<sup>[4]</sup>. Berdasarkan hasil penelitian tersebut menyatakan bahwa pengaruh kandungan Mo terhadap perubahan fasa dan sifat termal<sup>[5]</sup> menunjukkan bahwa kenaikan kandungan Mo dalam paduan UMo 7 %, 8 % dan 9 % tidak memberikan perbedaan sifat termal yang signifikan. Hal yang sama diperoleh dari pengamatan secara fisika seperti densitas dan pori serta metalurgi menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kandungan Mo pada pemanasan hingga 1100 °C tidak menyebabkan perubahan fasa yang signifikan<sup>[6]</sup>. Secara umum proses pengujian terhadap pelat U-7%Mo sebelum iradiasi telah memenuhi spesifikasi bahan bakar reaktor riset. Penelitian selanjutnya telah direncanakan untuk melakukan proses fabrikasi bahan bakar PEB U-7%Mo/Al dengan menggunakan uranium diperkaya sebesar 19,75 % kandungan  $^{235}\text{U}$ , kemudian dilakukan proses iradiasi di dalam *core* reaktor dan uji pasca iradiasi atau *post irradiation examination* (PIE) di *hotcell* Instalasi Radiometalurgi (IRM) pada tahun mendatang.

Dalam usaha untuk menjamin mutu PEB U-7%Mo/Al sesuai dengan spesifikasi yang dipersyaratkan dalam bahan bakar reaktor riset maka selain uji pra iradiasi perlu dilakukan pula uji pasca iradiasi. Uji pasca iradiasi dilakukan karena bahan bakar setelah dikenakan proses iradiasi di reaktor akan mengalami perubahan komposisi dan sifat kimia, sifat fisika dan mekanik<sup>[7]</sup>. Perubahan kimia terjadi karena sebagian besar disebabkan oleh terbentuknya radio-nuklida sebagai hasil belah dari reaksi fisi  $^{235}\text{U}$  dan reaksi tangkapan neutron pada  $^{238}\text{U}$ . Perubahan karakteristik bahan bakar tersebut dapat menyebabkan turunnya ketangguhan bahan bakar sehingga perlu dievaluasi dampak penurunan unjuk kerja bahan bakar tersebut terhadap tingkat keselamatan penggunaan dalam reaktor<sup>[8]</sup>. Oleh karena itu, dalam rangka mendukung

pengembangan teknologi fabrikasi PEB paduan U-7%Mo, pada penelitian ini akan dilakukan simulasi uji pasca iradiasi secara radiokimia guna mendapatkan metoda uji yang valid dalam penentuan parameter unjuk kerja bahan bakar pasca iradiasi secara radiokimia.

Metode radiokimia digunakan dalam pengujian bahan bakar pasca iradiasi untuk menentukan nilai *burn up* atau fraksi bakar melalui pengukuran kandungan radionuklida sebagai hasil reaksi fisi antara  $^{235}\text{U}$  dengan neutron termal selama proses iradiasi. Salah satu radionuklida hasil fisi yang dapat digunakan sebagai indikator *burn up* bahan bakar nuklir adalah kandungan radionuklida  $^{137}\text{Cs}$ . Pertimbangan pemilihan hasil fisi radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  sebagai indikator *burn up* adalah berdasarkan umur paroh  $^{137}\text{Cs}$  yang panjang (30,17 tahun) dan tampang serapan neutron yang kecil serta memiliki *fission yield* yang lebih tinggi dibandingkan dengan radionuklida lainnya<sup>[9]</sup>. Berdasarkan hal ini maka analisis  $^{137}\text{Cs}$  memiliki peranan penting dalam evaluasi unjuk kerja bahan bakar pasca iradiasi. Oleh karena itu untuk penentuan  $^{137}\text{Cs}$  dalam bahan bakar diperlukan metode yang valid, data yang akurat dan tertelusur.

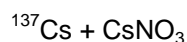
Penentuan radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dalam bahan bakar uranium pasca iradiasi dapat dilakukan dengan beberapa metode diantaranya adalah metode pengendapan menggunakan garam  $\text{CsNO}_3$  sebagai carier dan  $\text{HClO}_4$  sebagai pereaksi, serta metode penukar kation menggunakan zeolit Lampung<sup>[10]</sup>. Ke dua metode ini telah diterapkan dalam pemisahan cesium dari larutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$  di IRM dan merupakan metode baku hasil pengembangan dari metode standar ASTM. Penggunaan resin zeolit Lampung dalam proses pertukaran

kation dengan  $^{137}\text{Cs}$  sangat dipengaruhi oleh kapasitas tukar kation (KTK) dari zeolit. Beberapa faktor menunjukkan bahwa KTK sangat dipengaruhi oleh kandungan unsur Si dan Al atau ratio (Si/Al). Zeolit Lampung mempunyai ratio Si/Al lebih tinggi bila dibandingkan dengan jenis zeolit lainnya, seperti zeolit Bayah dan zeolit Tasik. Adapun komposisi kimia dari zeolit Lampung seperti yang tercantum pada Tabel.1.

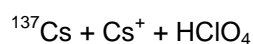
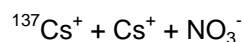
Tabel 1. Komposisi kimia zeolit Lampung.

Komposisi Oksida	Zeolit Lampung (% berat)
$\text{SiO}_2$	68,07
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1,53
$\text{Al}_2\text{O}_3$	16,52
$\text{CaO}$	2,27
$\text{MgO}$	0,57
$\text{Na}_2\text{O}$	0,93
$\text{K}_2\text{O}$	2,28
P	0,034
$\text{TiO}_2$	0,135
MnO	0,033

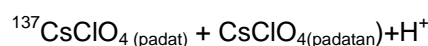
Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan penggunaan metode pengendapan dan penukar kation untuk pemisahan cesium dari PEB U-7Mo/Al. Pengaruh unsur pemadu Mo dalam bahan bakar paduan uranium PEB U-7Mo/Al dalam proses pengendapan dan pertukaran kation diamati melalui besarnya nilai rekoveri proses. Berdasarkan sifat kimia bahwa perkhlorat akan bersifat reduktan pada logam transisi dalam larutan (*aqueous solution*) dan reaksi yang terjadi adalah reaksi redoks. Hal ini menunjukkan bahwa kemungkinan Mo tidak terikut dalam proses pengendapan. Persamaan reaksi kimia yang terjadi pada proses pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dalam bahan bakar PEB U-7Mo/Al menggunakan  $\text{CsNO}_3$  sebagai *carrier* dan pereaksi  $\text{HClO}_4$  pekat pada proses pengendapan terjadi sebagai berikut<sup>[9,10]</sup>:



→



→



Pada proses pertukaran kation menggunakan zeolit Lampung adanya unsur

Mo diduga akan mempengaruhi proses adsorpsi cesium dengan zeolit. Hal ini

berdasarkan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa Mo dalam larutan dengan kondisi asam akan berada sebagai kation  $\text{Mo}^{6+}$  yang kemungkinan dapat teradsorpsi ke dalam zeolit<sup>[11]</sup>. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mengetahui metode pemisahan yang memenuhi persyaratan analisis radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dalam larutan PEB U-7Mo/Al pasca iradiasi dan selanjutnya dijadikan sebagai metode baku untuk perhitungan *burn up*<sup>[12]</sup>.

## METODOLOGI

Bahan uji yang digunakan adalah potongan PEB U-7%Mo/Al dengan berat sekitar 0,388 g dan dilarutkan dalam HCl 6N dan  $\text{HNO}_3$  6N. Larutan standar yang digunakan sebagai pembanding adalah larutan standar radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dengan aktivitas 3,37 Bq dari NIST (*National Institute of Standard And Technology*). Sebelum melakukan pengukuran  $^{137}\text{Cs}$  di dalam bahan bakar PEB U-7%Mo/Al menggunakan alat spektrometer gamma, terlebih dahulu harus dilakukan kalibrasi energi dan penentuan unjuk kerja alat spektrometer gamma. Kalibrasi dilakukan dengan standar  $^{60}\text{Co}$  dan penentuan unjuk kerja alat spektrometer gamma dilakukan dengan pengukuran larutan standar SRM  $^{137}\text{Cs}$  dengan 5 kali pengulangan. Selain kalibrasi energi dan unjuk kerja alat, hal penting yang harus diketahui adalah rekovery pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  menggunakan metode pengendapan maupun dengan metode penukar kation.

Penentuan besar rekovery dari metode pengendapan dilakukan dengan menggunakan larutan standar sekunder  $^{137}\text{Cs}$  sebanyak 50  $\mu\text{L}$  dalam 2 mL HCl 0,1 N. Sebelum dikenakan proses pemisahan dengan metode pengendapan, larutan standar radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  diukur langsung menggunakan spektrometer gamma. Hal ini bertujuan untuk mengetahui jumlah cacah dan kandungan radionuklida

$^{137}\text{Cs}$  dalam sampel standar. Ke dalam larutan standar  $^{137}\text{Cs}$  tersebut kemudian ditambahkan senyawa  $\text{CsNO}_3$  sebanyak 225 mg sebagai carrier dan dibiarkan sampai larut secara sempurna. Larutan kemudian ditempatkan dalam penangas es dengan temperatur yang termonitor agar selalu berada pada  $< 0^\circ\text{C}$ . Pada kondisi tersebut ditambahkan larutan  $\text{HClO}_4$  pekat sebanyak 4 mL dan proses pengendapan berlangsung selama 1 jam. Endapan  $\text{CsClO}_4$  yang terbentuk dipisahkan dari fasa air (supernatan) dengan memipet larutan dan dimasukkan ke dalam vial. Besarnya kandungan  $^{137}\text{Cs}$  dalam endapan  $\text{CsClO}_4$  dan dalam supernatan selanjutnya dianalisis dengan menggunakan spektrometer gamma. Untuk menyamakan geometri dalam pengukuran menggunakan spektrometer gamma maka diukur nilai cacah sebelum proses pengendapan dengan nilai cacah  $^{137}\text{Cs}$  di dalam supernatan (%). Perhitungan nilai rekovery pengendapan dilakukan dari nilai 100 % dikurang dengan % perbandingan  $^{137}\text{Cs}$  dalam supernatan.

Pemisahan radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  menggunakan metode penukar kation dilakukan dengan penambahan resin zeolit Lampung. Larutan PEB U-7Mo/Al sebanyak 150  $\mu\text{L}$  ditambah larutan standar 50  $\mu\text{L}$  dalam 2 mL HCl 0,1N dan ditambahkan zeolit Lampung seberat 400 mg. Penukar kation dilakukan dengan proses pengocokan selama 1 jam dan didiamkan selama 24 jam dengan tujuan untuk menyempurnakan pemisahan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit sebagai fasa padat dengan supernatan sebagai fasa cair. Hasil proses penukar kation menggunakan zeolit Lampung diperoleh dalam bentuk padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit dan supernatan. Kandungan radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dalam padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit maupun supernatan dianalisis secara kuantitatif menggunakan spektrometer gamma dengan 5 kali pengulangan secara triplo.

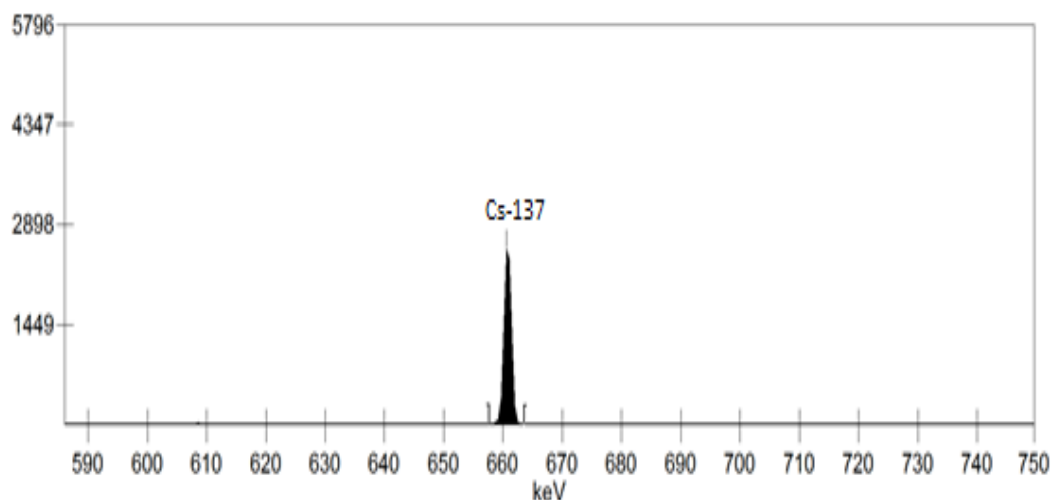
Hasil analisis radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  yang terdapat dalam endapan  $^{137}\text{CsClO}_4$  maupun dalam padatan  $^{137}\text{Cs}$ -zeolit yang diukur menggunakan spektrometer gamma dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan X-ray florecence (XRF).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil kalibrasi energi spektrometer gamma dengan menggunakan standar  $^{60}\text{Co}$  diperoleh radionuklida  $^{60}\text{Co}$  berada pada energi 1173,24 keV dan 1322,5 keV. Hasil ini sesuai dengan data energi yang tercantum pada *Recommended data* untuk radionuklida  $^{60}\text{Co}$ . Nilai resolusi FWHM (*Full*

*Width Half Maximum*) diperoleh sebesar 1,86 dan sesuai dengan yang tertera pada *mannual* alat spektrometer gamma. Penentuan unjuk kerja alat diperoleh presisi dan akurasi pengukuran  $^{137}\text{Cs}$  masing-masing sebesar 1,875 % dan 0,375 %. Besaran diatas menunjukkan bahwa alat spektrometer gamma mampu digunakan untuk menganalisis radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  dengan derajat kepercayaan 95%.

Spektrum radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  hasil pengukuran dari larutan standar SRM diperoleh pada energi 661,8 keV seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Spektrum standar radionuklida  $^{137}\text{Cs}$  pada energi 661,8 keV

Data kalibrasi, presisi dan akurasi yang diperoleh dan didukung oleh Gambar 1 menunjukkan bahwa spektrometer gamma mempunyai unjuk kerja sesuai dengan persyaratan analisis untuk pengukuran radionuklida  $^{137}\text{Cs}$ .

Rekoveri merupakan salah satu parameter validasi metode yang dilakukan untuk mendapatkan unsur yang dianalisa bebas dari unsur lainnya agar diperoleh hasil analisis yang akurat. Nilai rekoveri digunakan sebagai koreksi terhadap data analisis jika hasil uji t dari pengukuran lebih besar dari t tabel atau ( $t_{ukur} < t_{tabel}$ ). Rekoveri

pemisahan cesium yang terkandung di dalam larutan bahan bakar PEB U-7Mo/Al menggunakan metode pengendapan dilakukan secara triplo. Besarnya rekoveri hasil pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dengan metode pengendapan dibandingkan dengan hasil pengukuran langsung  $^{137}\text{Cs}$  seperti yang tercantum pada Tabel 1. Tabel 1 menunjukkan bahwa pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dari larutan PEB U-7Mo/Al dengan metode pengendapan diperoleh nilai rekoveri rerata sebesar 95,565 % dengan standar deviasi (SD) sebesar 0,035.

Tabel 2. Rekoveri pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dari larutan PEB U-7Mo/Al menggunakan metode pengendapan

Pengulangan (triplo)	Cacah per detik (cps)		Perbandingan dalam standar $^{137}\text{Cs}$ dan supernatan, a (%)	Rekoveri pemisahan (100 - a), %
	Sebelum proses pengendapan	Sesudah proses pengendapan		
1	5,6352	0,2315	4,41	95,59
2	5,5103	0,2339	4,46	95,54
3	5,6352	0,2315	4,41	95,59
Rerata				95,57
SD				3,50

Besarnya  $t_{ukur}$  ditentukan berdasarkan persamaan (5)<sup>[13]</sup>

$$t_{ukur} = (1 - \text{Rec}_{rerata}) / \mu_{rec} \quad (1)$$

$$\mu_{rec} = (SD / V_n) \quad (2)$$

dengan :

SD = standar deviasi pengukuran

n = jumlah replikat (3)

Nilai SD dan n yang diperoleh disubstitusikan ke dalam persamaan (2) sehingga diperoleh  $\mu_{rec}$  sebesar 0,283. Nilai  $t_{ukur}$  ditentukan berdasarkan persamaan (1) dengan mensubstitusi nilai  $\text{Rec}_{rerata}$  dan  $\mu_{rec}$  masing-masing berurutan sebesar 97,57 dan 0,283, akhirnya diperoleh  $t_{ukur}$  sebesar 0,106. Berdasarkan nilai t tabel pada derajat kepercayaan ( $\alpha$ ) 95 % dengan derajat kebebasan 2 diperoleh  $t_{0,05,2}$  sebesar 4,3<sup>[14]</sup>. Fakta ini menunjukkan bahwa  $t_{ukur} < t_{tabel}$  sehingga data analisis yang telah di evaluasi tidak perlu dikoreksi dengan nilai rekoveri.

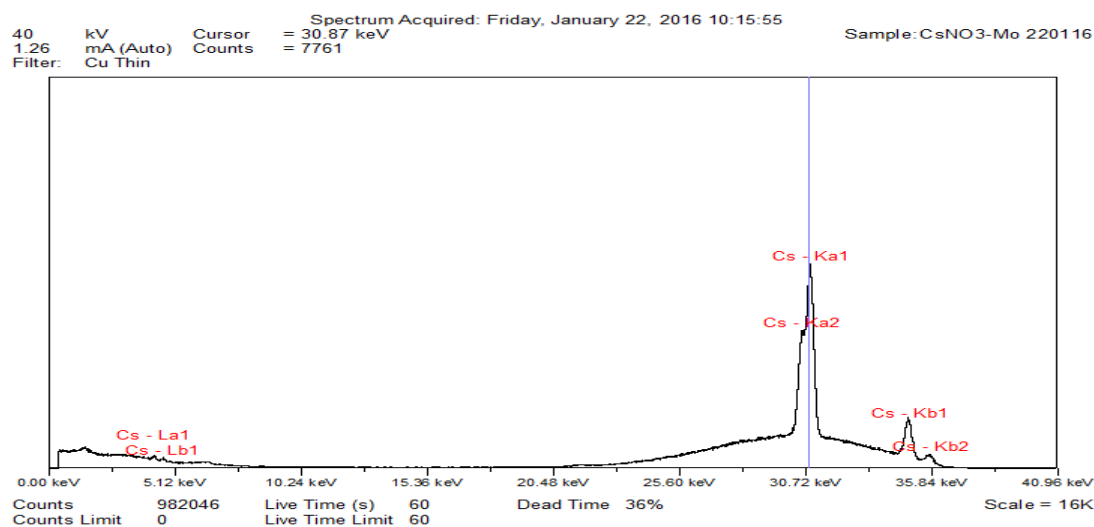
Nilai rekoveri pemisahan cesium dengan metode pengendapan dari larutan PEB U-7Mo/Al yang diperoleh mendekati nilai rekoveri pemisahan cesium dari larutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$  hasil penelitian sebelumnya<sup>[10]</sup> seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3

Tabel 3. Data rekoveri metode pengendapan pada larutan PEB U-7%Mo/Al dan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ <sup>[10]</sup>

Sampel	Rekoveri pemisahan (%)
PEB U-7Mo/Al	95,57
PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$	98,01

Besarnya rekoveri pengendapan  $\text{CsClO}_4$  pada PEB U-7%Mo/Al dan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$  tidak mempunyai perbedaan. Hal ini didukung oleh data uji beda (uji F) yang telah diperoleh bahwa nilai  $F_{ukur} < F_{Tabel}$  (183,24 dan 500), sehingga perbedaan nilai rekoveri pada PEB U-7Mo/Al dan  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$  secara statistik tidak signifikan<sup>[14]</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dengan parameter metode pengendapan pada PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$  dapat diterapkan juga pada PEB U-Mo7%/Al.

Kesesuaian rekoveri menggunakan metode pengendapan pada pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dalam PEB U-7%Mo/Al menunjukkan bahwa unsur Mo yang terdapat dalam bahan bakar PEB U-7% Mo tidak berpengaruh pada proses pengendapan  $\text{CsClO}_4$ . Hal ini dapat dinyatakan bahwa Mo tidak ikut mengendap sesuai dengan pustaka<sup>[11]</sup>. Fakta ini didukung oleh hasil analisis Cs di dalam endapan  $\text{CsClO}_4$  dengan menggunakan spektrometer *X-ray Florecence* (XRF) seperti yang terlihat pada Gambar 2. Gambar 2 menunjukkan bahwa spektrum yang muncul pada energi sinar-X karakteristik untuk Cs pada 30,381 keV. Berdasarkan tabel energi sinar-X karakteristik, unsur Mo memiliki energi sinar-X karakteristik energi 17,441 keV (K alpha) dan 19,065 keV dan pada ke dua energi tersebut tidak tampak pada spektrum Gambar 2. Hal ini membuktikan bahwa endapan  $\text{CsClO}_4$  tidak mengandung unsur Mo.



Gambar 2. Spektrum cesium hasil pengukuran endapan  $\text{CsClO}_4$

Hasil pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dalam PEB U-7%Mo/Al dengan menggunakan metode pertukaran kation dengan resin zeolit

Lampung ditunjukkan dari nilai rekoveri pemisahan seperti yang tercantum pada Tabel 4.

Tabel 4. Data rekoveri pemisahan cesium dengan metode pertukaran kation

Pengulangan	Cacah per detik (Cps)			Rekoveri (%)
	sebelum proses	sesudah proses		
		<sup>137</sup> Cs-zeolit	supernatan	
1	5,6352	1,6252	3,8413	26,73
2	5,5103	1,6099	3,8479	26,33
3	5,6352	1,6252	3,8413	26,73
Rerata				26,73

Tabel 2 menunjukkan bahwa rekoveri metode pertukaran kation dengan resin zeolit Lampung sangat rendah. Perbedaan rekoveri metode penukar kation untuk bahan bakar PEB U-7%Mo/Al dengan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$  cukup signifikan seperti yang terlihat pada Tabel 5.

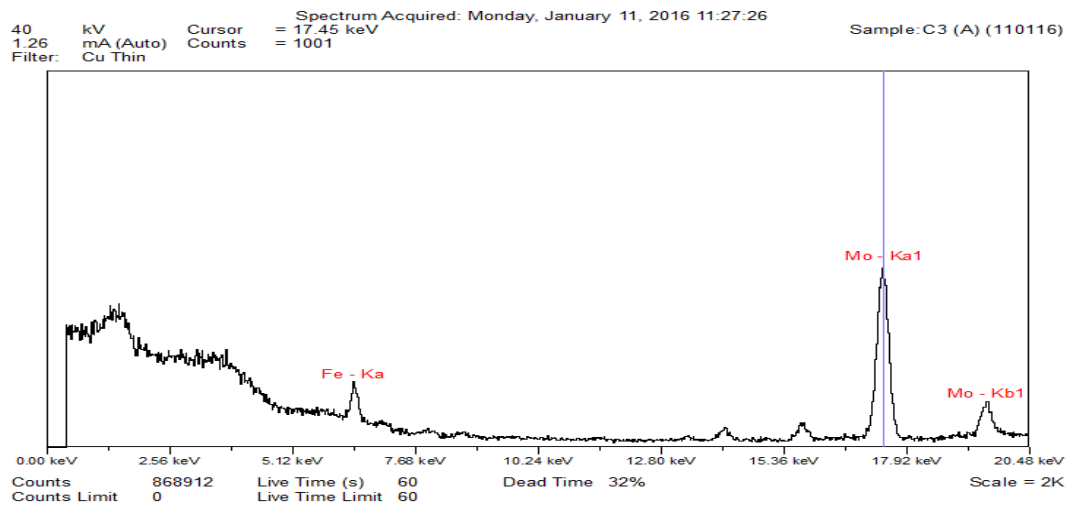
Tabel 5. Data rekoveri metode pertukaran kation pada pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dalam PEB U-7%Mo/Al dan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ <sup>[10]</sup>

Sampel	Rekoveri pemisahan (%)
PEB U-7Mo/Al	26,73
PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$	99,03

Tabel 5 menunjukkan bahwa nilai rekoveri pemisahan Cs dengan metode penukar kation pada PEB U-7%Mo/Al lebih

rendah dari pada PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ . Fakta ini menunjukkan bahwa unsur Mo sangat berpengaruh pada proses adsorpsi Cs oleh zeolit. Fenomena ini dimungkinkan karena jumlah kandungan Mo dalam sampel lebih banyak dari pada Cs. Unsur Mo di dalam bahan bakar U-7Mo/Al merupakan unsur padu, sedangkan Cs merupakan produk hasil fisi  $^{235}\text{U}$ . Hal ini menyebabkan terjadinya kompetisi dalam penyerapan Cs oleh zeolit Lampung, sehingga rekoveri cesium diperoleh sangat kecil yaitu 26,73 %. Pengaruh unsur Mo pada proses penukar kation cesium dengan zeolit Lampung dibuktikan dari data hasil pengukuran padatan Cs-zeolit sebagai hasil dari proses pertukaran zeolit Lampung dengan Mo seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.





Gambar 3. Spektrum hasil analisis zeolit- Cesium dengan spektrometer XRF

Gambar 3 menunjukkan bahwa spektrum sinar-X karakteristik Mo terjadi pada energi 17,441 keV dan 19,065 keV. Hal ini menunjukkan bahwa unsur Mo dalam larutan PEB U-7%Mo/Al berada sebagai kation  $\text{Mo}^{4+}$  sehingga dapat ikut teradsorpsi oleh zeolit<sup>[5]</sup>. Beberapa hasil penelitian sebelumnya menyatakan bahwa perbedaan kapasitas adsorpsi zeolit pada ion logam sangat dipengaruhi oleh beberapa karakter kationnya diantaranya adalah jari-jari terhidrasi, entalpi hidrasi dan solubilitas dari kation. Jari-jari hidrasi kation cesium sebesar 265 pm sedangkan jari-jari kation Mo terhidrasi sebesar 139 pm.

Pustaka<sup>[15]</sup> menyatakan bahwa kation dengan ukuran kecil dapat masuk ke dalam mikropori dan kerangka struktur zeolit dengan mudah. Kation dengan ukuran kecil dapat lebih mudah diadsorpsi dari pada kation dengan ukuran lebih besar. Sama halnya yang terjadi pada logam  $\text{Pb}^{2+}$  dengan jari-jari terhidrasi sebesar 4,01 Å teradsorpsi lebih mudah ke dalam zeolit dari pada logam  $\text{Cu}^{2+}$  yang memiliki jari-jari hidrasi lebih besar yaitu 4,19 Å. Berdasarkan fenomena ini maka kation  $\text{Mo}^{6+}$  akan lebih mudah teradsorpsi dibandingkan dengan kation  $\text{Cs}^+$ . Namun sebaliknya, bila ditinjau dari nilai entalpi hidrasi kation  $\text{Cs}^+$  akan lebih

mudah teradsorpsi oleh zeolit Lampung. Entalpi hidrasi adalah jumlah energi yang diperlukan saat pelepasan molekul air dari kation. Hal ini menunjukkan bahwa semakin rendah entalpi atau energi hidrasi suatu senyawa maka semakin mudah molekul air terlepas maka semakin cepat terbentuk kation yang akan berinteraksi dengan adsorben atau zeolit. Fenomena ini akan menyebabkan kation mudah diadsorpsi oleh zeolit Lampung. Dalam sistim periodik unsur (logam dan non logam) menyatakan adanya keterkaitan nilai entalpi atau besarnya energi hidrasi dengan elektronegativitas. Semakin besar nilai elektronegativitas suatu unsur maka semakin kecil entalpi atau energi hidrasi. Kecenderungan elektronegativitas dalam sistim periodik unsur menunjukkan bahwa semakin ke kanan golongan maka elektronegativitas unsur semakin meningkat. Unsur cesium berada pada golongan IA tabel priodik dengan nilai elektronegativitas sebesar 0,79 kJ/mol, sedangkan unsur Mo berada pada golongan transisi IVB dengan nilai elektronegativitas 2,16 kJ/mol. Fakta ini menggambarkan bahwa ion cesium yang memiliki elektronegativitas lebih rendah dari Mo akan lebih mudah teradsorpsi dari pada Mo. Ke dua faktor tersebut menunjukkan bahwa terjadi kompetisi unsur Cs dan Mo

yang cukup signifikan dalam proses adsorpsi oleh zeolit. Hasil penelitian ini menjadikan bahwa metode penukar kation dengan resin zeolit Lampung tidak bisa digunakan dalam pemisahan cesium dari larutan PEB U-7%Mo/Al

## SIMPULAN

Penggunaan metode pengendapan untuk pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dalam larutan PEB U-7Mo/Al menggunakan  $\text{CsNO}_3$  sebagai *carrier* dan asam perklorat ( $\text{HClO}_4$ ) pada temperatur  $0^\circ\text{C}$  diperoleh akurasi dan rekoveri metode masing-masing sebesar 0,0375 % dan 95,565 %. Penggunaan zeolit Lampung sebagai resin dalam metode penukar kation tidak dapat digunakan untuk pemisahan  $^{137}\text{Cs}$  dari larutan PEB U-7Mo/Al karena rekoveri  $^{137}\text{Cs}$  diperoleh sangat kecil sekitar 26,73%. Hal ini disebabkan karena kandungan Mo dalam PEB U-7%Mo/Al berpengaruh cukup besar terhadap adsorpsi Cs oleh zeolit. Unsur Mo dalam larutan PEB U-7%Mo/Al berada sebagai kation  $\text{Mo}^{6+}$  sehingga ikut teradsorpsi dengan zeolit dan terjadi kompetisi unsur Cs dan Mo yang cukup signifikan dalam proses adsorpsi oleh zeolit.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh staf Fisika kimia yang telah membantu pelaksanaan kegiatan penelitian ini sehingga pembuatan makalah ini dapat terlaksana dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Supardjo, H. Suwarno dan A. Kadarjono, (2009), Karakterisasi Paduan U-7Mo/Al dan U-X%Mo-X%Si(X=1,2-3%) Hasil Proses Peleburan Dalam Tungku Busur Listrik, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir "URANIA", Vol 15 No.4
- [2] Supardjo, (2011), Pengembangan Paduan Uranium Berbasis UMo Sebagai Kandidat Bahan Bakar Nuklir Reaktor Riset Menggantikan Bahan Bakar Reaktor Riset Dispersi  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ , Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV.
- [3] Suparjo, Agoeng K dan Wisnu Ari Adi, (2010), Pembentukan *Single Phase* Paduan  $\text{U7Mo.xTi}$  Dengan Teknik Peleburan Menggunakan Tungku Busur Listrik, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir "URANIA", Vol 16, No 4
- [4] Supardjo, Boybul, Agoeng Kadarjono, (2012), Pembuatan Pelat Elemen Bakar Mini UMo-Al Dengan Densitas Uranium 6 dan 7  $\text{gU/cm}^3$ , Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, Vol 8 No.2.
- [5] Aslina Br Ginting, Suparjo, Agoeng Kadarjono, Dian Anggraini, (2011), Pengaruh Kandungan Molibdenum Terhadap Perubahan Fasa Dan Kapasitas Panas Ingot Paduan UMo, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir "URANIA", Vol 17 No.2.
- [6] Aslina Br. Ginting, Supardjo, (2012), Komparasi Analisis Reaksi Termokimia Matrik Al Dengan Bahan Bakar UMo/Al Dan  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$  Menggunakan *Differential Thermal Analysis*, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir "URANIA", Vol 18 No.1, Terakreditasi.
- [7] Maman Kartaman A, Aslina Br. Ginting, Supardjo, Boybul, (2016), Pengaruh Temperatur Dan Iradiasi Terhadap Interdifusi Partikel Bahan Bakar Jenis U-7Mo/Al, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir "URANIA", Vol 22 No.1, Terakreditasi
- [8] Yusuf Nampira, Sri Ismarwanti, (2014), Uji Tidak Merusak Bahan Bakar  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$  Tingkat Muat Uranium 4,8  $\text{gU/cm}^3$  Pasca Iradiasi Fraksi Bakar 20 dan 40%, Jurnal Teknologi

- Bahan Nuklir, Vol 10, No.2, Terakreditasi, ISSN 1907-2635.
- [9] Dian A, Arif Nugroho, Aslina B. Ginting, Yusuf Nampira, Boybul, (2013), Penentuan Parameter Optimum Proses Pengendapan  $\text{CsClO}_4$  Pada Pemisahan Isotop  $^{137}\text{Cs}$  Dari Larutan PEB  $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$  Pasca Iradiasi, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir "URANIA", Vol 19 No.2, Terakreditasi.
- [10] Aslina B. Ginting, Dian Anggraini, (2016), Metode Pengendapan Dan Penukar Kation Untuk Pemisahan Cesium Dalam Bahan Bakar  $\text{U}_3\text{Si}_2\text{-Al}$ , Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir "URANIA", Vol 22 No.2, Terakreditasi.
- [11] Syouhel Nishihoma and Kozunohanu, (2009), *Ion Exchange Adsorption of Molybdenum with Zeolitic Adsorbent*, Journal Environment Engineering Management, 19(16).
- [12] Jung Suk Kim, Young Skin Jeon, (2006), *Dissolution and Burn Up Determination of Irradiated U-Zr Alloy Nuclear Fuel by Chemical Methods*, Journal Korea Atomic Energy Research Institute.
- [13] Yulia Kantasubrata, (2015), Recovery, Diklat di PTBBN
- [14] Robert. L. Anderson, (1987), *Practical Statistics For Analytical Chemist*, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- [15] Afrodita Zensdelska, Mijana Golomeova, (2014), *Effect of Competing Cations (Cu, Zn, Mn, Pb) Adsorbed By Natural Zeolit*, Data Publications, ISSN 2348- 4098, vol 2, June 2014.

